

действуют на глубину и завершенность основных кристаллохимических преобразований минеральной основы сырья, что способствует повышению эффективности производства.

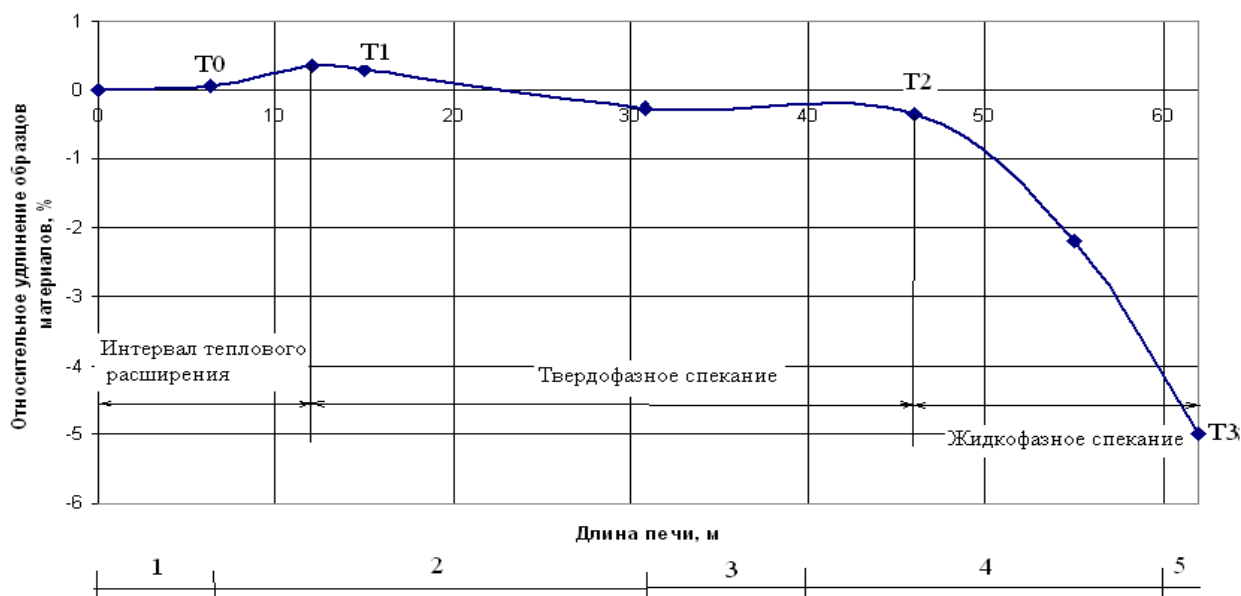


Рис. 3. Изменение линейных размеров образцов исходных материалов и протяженности зон их уплотнения во вращающейся печи:

T0 – начало спекания; T1 – начало интенсивного твердофазного спекания;
T2 – начало образования жидкой фазы; T3 – начало интенсивного образования жидкой фазы;
1 – зона сушки; 2 – зона разложения сульфидов и карбонатов;
3 – восстановительная зона; 4 – окислительная зона; 5 – зона охлаждения

Таким образом, при вельцевании шлаковых компонентов во вращающейся печи в присутствии углерода твердого топлива развиваются сложные физико-химические процессы, учет развития которых позволит существенно изменить эффективность производства.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЖЕЛЕЗОРУДНОГО СЫРЬЯ И КОКСА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ

Витькина Г.Ю., Дмитриев А.Н., Чесноков Ю.А.

*Институт металлургии УрО РАН,
г. Екатеринбург, Россия*

Традиционные способы совершенствования технологии доменной плавки – снижение расхода кокса и повышение производительности – в значительной степени исчерпаны. В их числе наиболее значимые: содержание железа в шихте, использование добавок к дутью (природный газ), нагрев дутья в воздухонагревателях и др. Наиболее перспективным способом, на наш взгляд, является повышение качества железорудного сырья и кокса.

Важным моментом в совершенствовании технологии доменной плавки является использование математического моделирования доменного процесса, которое позволяет изучать выходные параметры доменной плавки (расход кокса; производительность; степень использования восстановительного потенциала газа; температурные поля шихты и газа, в том числе трехмерные; линии равных степеней восстановления) при изменении входных параметров (параметры дутья; параметры шихты, включая распределение по радиусу и окружности; профиль печи и др.) без промышленных испытаний.

Нами используется следующий подход к решению практических задач: лабораторные исследования на экспериментальных установках с определением качественных характеристик железорудного сырья и кокса, аналитическое исследование с помощью математических моделей [1–5], опытно-промышленные и промышленные испытания.

Показатели качества железорудных материалов

Для изучения влияния на эффективность доменной плавки нами выбраны следующие показатели качества – восстановимость и механическая прочность агломерата и окатышей.

Восстановимость агломерата и окатышей – важнейшая характеристика их качества, которую необходимо учитывать при оценке потребительских свойств подготовленного железорудного сырья [6; 7]. Под восстановимостью понимается способность железорудного материала с большей или меньшей скоростью отдавать кислород от оксидов железа газу-восстановителю. Ее роль возрастает по мере совершенствования доменного процесса и сокращения удельного расхода кокса.

Восстановимость определяется по ГОСТ 17212–84 (Россия). Восстановимость определяется как отношение массы отнятого кислорода к массе первоначально связанного кислорода, выраженное в процентах.

Восстановимость может быть определена также как стандартизированная степень восстановления, которая обычно рассчитывается по убыли в массе или по изменению химического состава восстанавливаемого образца [8].

Восстановимость агломерата определяется минералогическим составом, структурой и пористостью окучкованных материалов. Эти факторы в свою очередь зависят от основности агломерата, которая также влияет на его восстановимость, причем это влияние имеет сложный характер. При переходе от неофлюсованного агломерата к офлюсованному до основности $\text{CaO/SiO}_2 = 1,2\text{--}1,6$ восстановимость существенно улучшается; с ростом основности она снижается, затем вновь возрастает [9].

Пористость материалов в значительной степени определяет его восстановимость. Пористость промышленных агломератов изменяется в зависимости от разных факторов от 25 до 45 % при широком диапазоне размеров пор [10].

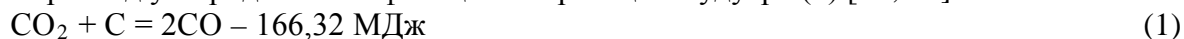
На российских аглофабриках содержание FeO в агломерате (в среднем по России около 14–15 %) задается исходя из соотношения необходимой для доменной плавки холодной прочности и низкого расхода топлива на агломерацию, что не позволяет получить высокую восстановимость конечного продукта. В связи с этим возникает задача достижения предельно низкого содержания FeO в агломерате, с обеспечением при этом максимальной восстановимости при сохранении высокой прочности.

Показатели качества кокса

По новому опыту эксплуатации доменных печей с большим удельным расходом при вдувании угля и мазута, можно сделать вывод, что кокс по химическим и физическим свойствам должен удовлетворять более высоким требованиям, чем прежде. Из приоритетных для исследования физико-химических свойств кокса в настоящее время выделяют реакционную способность *CRI* (*Coke Reactivity Index*) и «горячую» прочность кокса *CSR* (*Coke Strength after Reaction*), определяемые общепризнанным методом *NSC*, предложенным корпорацией *Nippon Steel*. На базе этого метода в зарубежных странах разработаны и применяются стандарты: британский *BS 4262–84*, американский *ASTM D 5341–93* и проект *ISO 18894:2006*, а в России – ГОСТ Р 50921–2005 [11].

Реакционная способность кокса является показателем интенсивности взаимодействия углерода кокса с диоксидом углерода в стандартных условиях испытания (при температуре нагрева кокса свыше 1100 °С), и определяется общей зольностью коксующего угля или угольной шихты, а также марочным составом угольной шихты [12]. Окончательное (рабочее) значение реакционной способности кокса формируется внутри печи при взаимодействии кокса с парами и пылью печной атмосферы шахты.

Считается, что показатель *CRI* должен быть как можно ниже и обеспечивать минимальный расход углерода на газификацию по реакции Будуара (1) [13; 14].



Диапазон требований к показателям качества кокса на зарубежных и отечественных заводах довольно широк, однако для большинства коксохимических заводов рекомендуемый показатель *CRI* находится в пределах 20–30 %.

Измерения на различных типах кокса показали, что, как и ожидалось, с уменьшением реакционной способности *CRI* заметно повышается его «горячая» прочность кокса *CSR*. Низкая реакционная способность определяет уменьшение степени развития реакций прямого восстановления железа, что снижает расход углерода кокса как теплоносителя и восстановителя.

Оценка кинетических характеристик кокса

В работе исследовался кокс доменный ОАО «Уральская Сталь» (г. Новотроицк). Характеристики указаны в табл. 1 [15].

Таблица 1

Характеристики кокса ОАО «Уральская сталь»

Наименование	Количество
Технический анализ кокса, %	
W_p	2,55
A_c	12,1
$S_{об}$	0,64
V_r	0,95
Прочность M_{25}	86,8
M_{10}	7,6
Ситовый состав, %	
> 80	21,3
80–60	37,9
60–40	31,9
40–25	5,9
25–0	3,0

Для определения реакционной способности кокса и определяющих ее кинетических характеристик были проведены по опыты на установке, соответствующей требованиям ГОСТа Р 50921–2005 (аналог сертифицированной установки с соблюдением всех параметров). Сущность метода заключается в реакции кокса с диоксидом углерода при температуре 1100 °С и определением массы остатка кокса после реакции. Показателем реакционной способности является выраженная в процентах потеря массы кокса после реакции с диоксидом углерода.

Показатель реакционной способности кокса определялся по формуле (2):

$$CRI = 100 \cdot \frac{\Delta G}{G}, \quad (2)$$

где ΔG – убыль массы кокса, г; G – масса навески кокса, г.

Всего было проведено три эксперимента при различных температурах нагрева $T_1 = 900$ °С, $T_2 = 1000$ °С, $T_3 = 1100$ °С в ходе которых фиксировалась убыль веса по времени, представленная на рис. 1 (данные обработаны методами линейной аппроксимации).

Для обработки экспериментальных данных использовался математический аппарат, предложенный в работах [3; 16].

$$\Delta G = \frac{K_{пр} \cdot (CO_2^0 - f(\Delta G)) \cdot G \cdot 273 \cdot P \cdot \tau}{1867 \cdot (1 + f(\Delta G)) \cdot \rho \cdot T \cdot 101,3} \quad (3)$$

где $K_{пр}$ – приведенная константа скорости реакции, с⁻¹; CO_2^0 – объемная доля CO_2 на входе в реактор; $f(\Delta G)$ – функция, с помощью которой учитывается среднее уменьшение CO_2 в слое кокса; G – масса навески, г; P – давление газа, кПа; τ – время опыта, с; ρ – плотность кокса, г/см³; T – заданная температура нагрева, К.

Приведенная константа скорости реакции в нашем случае примет вид:

$$K_{np} = \eta K_x = k_0 \cdot e^{-\frac{E}{RT}}, \quad (4)$$

где k_0 – предэкспоненциальный множитель, c^{-1} ; E – энергия активации, кДж/моль; R – газовая постоянная, кДж/моль·град.

Применяя метод определения энергии активации кокса из [17], получим для исследуемого кокса $k_0 = 3,9 \cdot 10^9 c^{-1}$; $E = 244,7$ кДж.

Исследован кокс промышленной крупности ОАО «Уральская Сталь» при различных температурах нагрева. Рассчитаны константа скорости, энергия активации реакции, позволяющие в первом приближении прогнозировать состав отходящего газа на выходе из слоя кокса при различных температурах процесса.

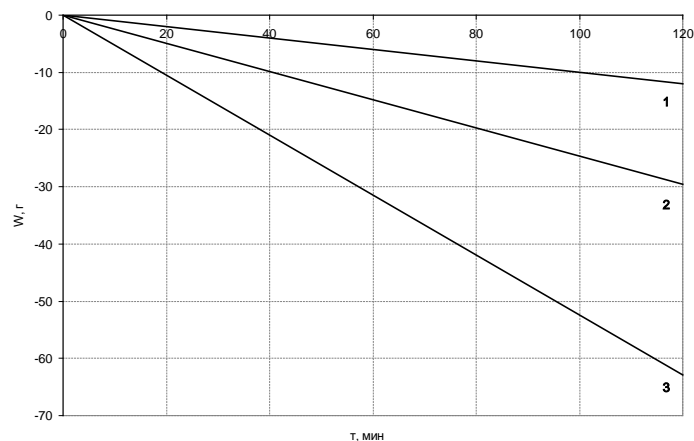


Рис. 1. Кинетические кривые угара кокса при температуре нагрева T :
1 – 900 °C (1173 K); 2 – 1000 °C (1273 K); 3 – 1100 °C (1373 K)

Влияние восстановимости и прочности железорудных материалов на показатели доменной плавки

С помощью балансовой логико-статистической модели [3] проведены расчеты для доменной печи №9 ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат», и за основу взят базовый вариант работы печи за 2009 г.: производительность печи, т чугуна/сут – 4488; расход кокса, кг/т чугуна – 437,61. Рассчитаны варианты влияния изменения восстановимости (от 69,46 до 94,46 %) и прочности (от 65,13 до 90,13 %) на технико-экономические показатели доменной плавки.

Как и ожидалось, существует известная альтернатива между этими двумя металлургическими характеристиками железорудного сырья: если ставится вопрос о достижении максимальной производительности доменной печи, то этого можно добиться путем повышения величины «холодной» прочности железорудной шихты и, напротив, если существует необходимость в снижении расхода кокса, то в качестве приоритета будет стоять задача увеличения восстановимости шихты (при прочих равных условиях). Для получения оптимальных значений производительности печи и расхода кокса рекомендуется применять железорудные материалы с показателями восстановимости и «холодной» прочности выше 80 % (рис. 2).

Влияние реакционной способности кокса на показатели доменной плавки

В работе исследовался кокс ОАО «Уральская Сталь». Усредненные металлургические характеристики кокса, масс. %: зольность – 12,1; влажность – 4,6; сернистость – 0,51; летучие – 1,1. Для определения реакционной способности кокса проведены опыты с коксом крупностью 20 мм на установке, соответствующей требованиям ГОСТа.

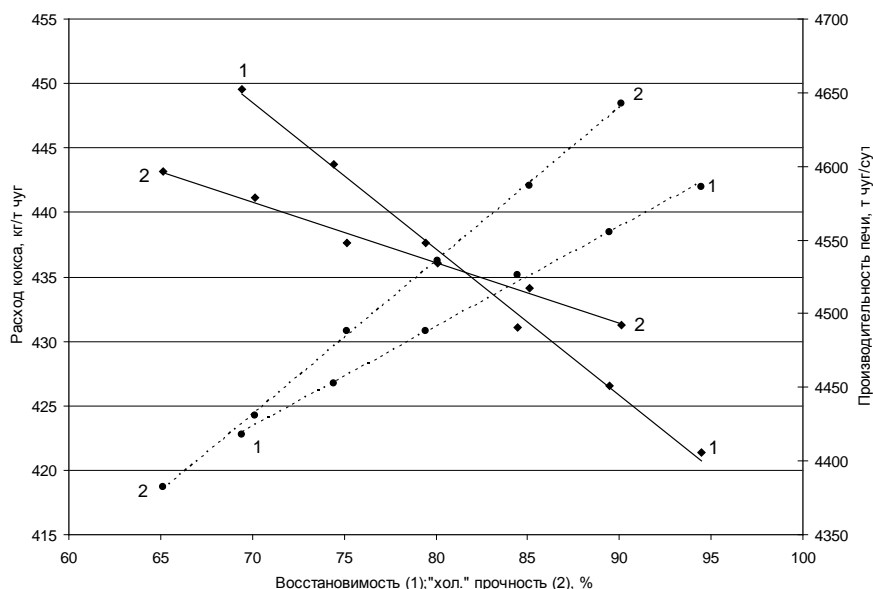


Рис. 2. Влияние восстановимости (1) и «холодной» прочности (2) на расход кокса (—), производительность печи (- - -)

За основу взят базовый вариант работы доменной печи №3 ОАО «Уральская Сталь» за 2009 г. Отчетные характеристики печи: полезный объем печи, м^3 – 1513; расход кокса, кг/т чугуна – 480,60; Расход железорудной части шихты, кг/т чугуна – 1694,80; выход доменного газа, $\text{м}^3/\text{т}$ чугуна – 1283,20; выход шлака, кг/т чугуна – 411; основность шлака CaO/SiO_2 – 1,08; содержание серы S в чугуне, % – 0,017.

Для расчета зависимостей производительности и расхода кокса в доменной печи значение реакционной способности варьировалось от 28 до 45 % (рис. 3). При увеличении реакционной способности кокса на 17 % производительность печи снизилась на 234,1 т чугуна/сут (9,44 %), расход кокса увеличился на 55,02 кг/т чугуна (11,48 %) для указанных условий, т.е. на 1 % увеличения значения реакционной способности производительность снижается на 0,555 %, а расход кокса увеличивается на 0,675 %.

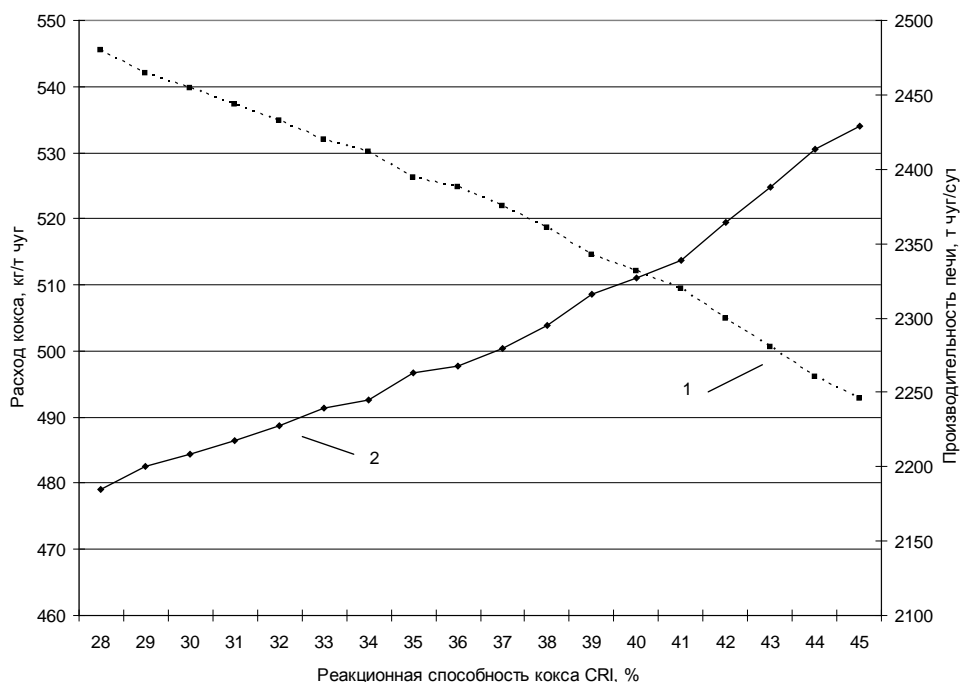


Рис. 3. Влияние реакционной способности кокса на производительность (1) и расход кокса (2) в доменной печи

Заключение

Таким образом, с помощью балансовой логико-статистической модели доменного процесса показано влияние таких характеристик железорудного сырья, как восстановимость и «холодная» прочность, реакционная способность на эффективность доменного процесса.

При расстановке приоритетов улучшения того или иного технико-экономического показателя доменного процесса следует учитывать, что наиболее оптимальные результаты производительности и расхода кокса можно достичь путем применения железорудного сырья с показателями восстановимости и «холодной» прочности выше 80 %.

Очевидно, что снижение значения реакционной способности кокса является экономически целесообразным и позволит улучшить эффективность доменного процесса. Также целесообразно усовершенствование технологии получения кокса с низкими показателями реакционной способности.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (заявка № 13–08–01223), проекта УрО РАН № 12–М–23457–2041.

Список использованных источников

1. Качество железорудного сырья и кокса – резерв совершенствования технологии доменной плавки: сборник трудов Седьмой международной научно-практической конференции «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности» 28–30.04.2009 / Г.Ю. Аржадеева, А.Н. Дмитриев, З.Н. Пастухова, Ю.А. Чесноков. СПб.: 2009. С. 301–302.
2. Основы теории и технологии доменной плавки / А.Н. Дмитриев, Н.С. Шумаков, Л.И. Леонтьев, О.П. Онорин. Екатеринбург: УрО РАН, 2005. 547 с.
3. Ченцов А.В., Чесноков Ю.А., Шаврин С.В. Балансовая логико-статистическая модель доменного процесса. Екатеринбург: УрО РАН, 2003. 164 с.
4. Dmitriev A.N., Chesnokov Yu.A. Reduction Kinetics of Iron Ore Materials by Gases. Defect and Diffusion Forum, Vols. 283–286. 2008. P. 45–52.
5. Dmitriev A.N., Perepechaev V.P., Chesnokov Yu.A. Influence of Elements Oxides Microadditives with Major Cationic Radius on Properties of Silicate Bundle. Defect and Diffusion Forum, Vols. 297–301. 2010. P. 1295–1300.
6. Аржадеева Г.Ю., Дмитриев А.Н., Чесноков Ю.А. Исследование влияния качественных характеристик железорудного сырья на показатели доменной плавки / Высокие технологии, исследования, промышленность. Т. 4: сборник трудов Девятой международной научно-практической конференции «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности». 22–23 апреля 2010. СПб.: 2010. С. 175–176.
7. Dmitriev A.N. The role of reducibility in achievement of the minimal coke consumption in the blast furnace smelting. Defect and Diffusion Forum, Vols. 258–260. 2006. P. 91–100.
8. Кобелев В.А., Пузанов В.П. К проблеме восстановимости железорудного агломерата // Сталь. 2000. № 12. С. 6–8.
9. Сырьевая и топливная база черной металлургии / Л.И. Леонтьев [и др.]. М.: ИКЦ «Академкнига», 2007. 304 с.
10. Волков Ю.П., Шпабер Л.Я., Гусаров А.К. Эксплуатация доменных печей. М.: Металлургия, 1991. 240 с.
11. Степанов Ю.В. О методах определения и оценки качества кокса // Бюллетень «Черная металлургия». 2005. № 1. С. 24–32.
12. Dmitriev A.N., Chesnokov Yu.A., Arzhadeeva G. Yu. Mathematical Model of Forecasting of Coke Quality Indicators. Defect and Diffusion Forum, Vols. 297–301. 2010. P. 1290–1294.
13. Можаренко Н.М. Опыт-промышленные испытания кокса, полученного по новым технологиям // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: сб. науч. тр. / Ин-т черн. металлургии НАН Украины. Украина, 2008. № 16. С. 187–195.

14. Dmitriev A.N., Chesnokov Yu.A., Arzhadeeva G.Yu., Lazebnaya Yu.P. Mathematical Model of Forecasting the Iron Ore Materials and Coke Quality Indicators. Defect and Diffusion Forum, Vols. 312–315. 2011. P. 1198–1203.

15. Сырье для черной металлургии. Справочник. Т.1. Сырьевая база и производство окучкованного сырья (сырье, технологии, оборудование) / М.Г. Ладыгичев [и др.]. М.: Машиностроение–1, 2001. 896 с.

16. Абрамов С.Д., Шаврин С.В., Ченцов А.В. Оценка характеристик кокса, определяющих его реакционную способность // Восстановление, теплообмен и гидродинамика в доменном процессе. – Свердловск: УНЦ АН СССР, 1970. С. 32–48.

17. Коган В.Е., Зенин Г.С., Пенкина Н.В. Физическая химия. Ч. 2. Химическая кинетика. СПб: СЗТУ, 2005. 226 с.

РАЗРАБОТКА РЕГЕНЕРАТИВНОЙ СИСТЕМЫ ОТОПЛЕНИЯ ДЛЯ ПРОХОДНОЙ РОЛИКОВОЙ ПЕЧИ

Воробьева Л.А.

*Национальная металлургическая академия Украины,
г. Днепропетровск, Украина*

Наибольшим промышленным потребителем топливно-энергетических ресурсов является горно-металлургический комплекс, в котором основным топливоиспользующим оборудованием являются печи. Нагревательные и термические печи металлургии и машиностроения нуждаются в улучшении показателей использования топлива и экологического состояния окружающей среды. Одним из основных направлений энергосбережения в нагревательных печах является глубокая утилизация теплоты продуктов сгорания на выходе из рабочего пространства печей с использованием малогабаритных теплообменников с нестационарным режимом работы.

Целью данной работы является разработка регенеративной системы отопления для проходной роликовой печи № 3, установленной в трубоволоочильном цехе ЗАО «Centravis production Ukraine», путем повышения степени утилизации теплоты печных газов.

Проходная роликовая печь предназначена для термообработки труб из нержавеющей сталей диаметром 20–95 мм, с толщиной стенок 1,5–33 мм и длиной 1,5–12 м. Режим термообработки включает в себя нагрев труб до температуры 1200 °С, выдержку при этой температуре и охлаждение. Движение труб в печи непрерывное, скорость движения 0,5–5 м/мин. Фактическое время работы печи за год $\tau_{\Gamma} = 4000$ ч/год [1]. Схема газовой роликовой печи представлена на рис. 1.

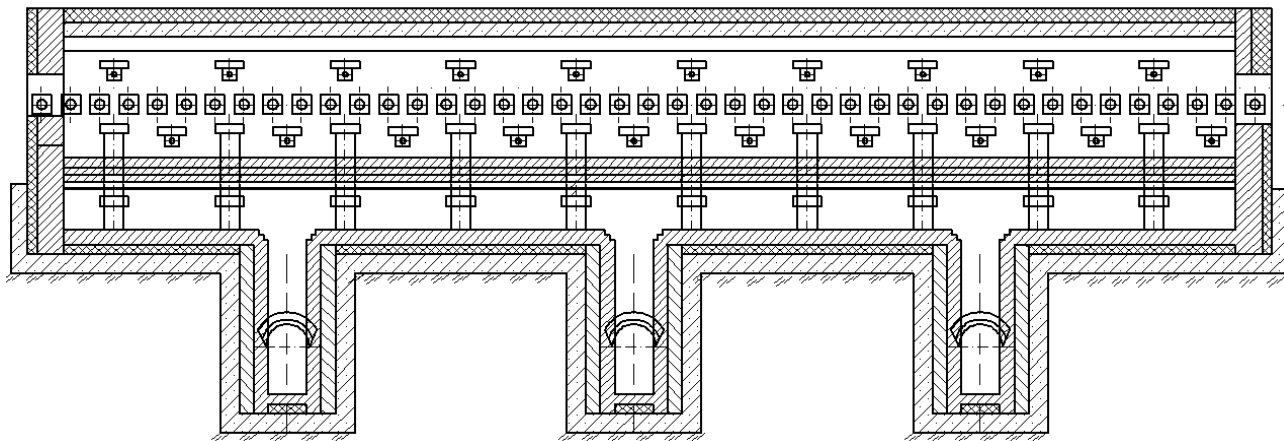


Рис. 1. Схема газовой роликовой печи